

皮秒激光微纳加工研究进展

杨冬冬, 蔡京辉

中国科学院理化技术研究所空间功热转换技术重点实验室, 北京 100190

摘要 皮秒激光具有皮秒(10^{-12} s)量级的脉冲宽度,与电光弛豫时间($10^{-6} \sim 10^{-12}$ s)相当或比电光弛豫时间更短。皮秒激光与材料作用时,由于电子来不及将能量传递给晶格,以至于整个加工过程中几乎没有热作用的存在,被称为“冷烧蚀”过程,因此皮秒激光在航空航天、国防、材料、医学、生物等领域的精密加工中有广泛的用途。简要介绍了研制适用于微纳加工的皮秒激光器的技术路线,综述了皮秒激光在高硬度金属精密制孔、硬脆性材料切割以及材料表面选择性去除方面的研究进展,探讨了目前皮秒激光微纳加工存在的问题,并展望了其可能的发展方向。

关键词 激光技术; 皮秒激光; 再生放大; 腔倒空; 微纳加工

中图分类号 TG485 **文献标识码** A

doi: 10.3788/LOP54.010004

Research Progress of Micro-Nano Fabrication by Picosecond Laser

Yang Dongdong, Cai Jinghui

*Key Laboratory of Space Energy Conversion Technology, Technical Institute of Physics and Chemistry,
Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China*

Abstract Picosecond laser has picosecond (10^{-12} s) pulse width, which is the same as the electro-optical relaxation time ($10^{-6} - 10^{-12}$ s) or even shorter. When picosecond laser interacts with materials, there is not enough time for electron to transfer the energy to crystal lattice. Therefore, there's little heating effect during fabrication, which is called cold ablation. This technology is widely used for precision machining in astronautics, national defense, materials, medical science, biological science and so on. The technique of micro-nano fabrication by picosecond lasers is introduced and the precision drilling on high hardness metal, the hard and brittle materials cutting and the selective surface removal with picosecond lasers are summarized. The challenges and future trends of micro-nano fabrication by picosecond lasers are pointed out.

Key words laser technique; picosecond laser; re-amplifier; cavity dumping; micro-nano fabrication

OCIS codes 140.3390; 140.3530; 140.3280; 320.7090

1 引言

20世纪50年代末,Feynman就预言了制造技术将沿着从大到小的途径发展,最终使加工尺度达到微米及纳米量级。传统的微纳加工手段包括光刻技术^[1]、电化学微加工技术^[2]、微注射成型^[3]以及纳米压印技术^[4]等,人们已经利用这些加工技术加工出了理想的产品。但是,随着科技的不断进步,研究者们总会寻求各种更为先进的微纳加工技术使得加工尺度更小、效率更高、过程更为简单。激光技术的发展推动了微纳加工的进程,拓宽了加工材料的种类,提高了加工质量和加工精度。与传统的微纳加工技术相比,激光微纳加工具有如下独特的优点:非接触加工不损坏工具,能量可调,加工方式灵活,可实现柔性加工等。其中全固态皮秒激光具有极窄的脉冲宽度(皮秒)、极高的峰值功率(兆瓦)以及优异的光束质量,被广泛应用于各种金属、非金属材料的精密加工。研究表明^[5],脉冲宽度高于10 ps的皮秒激光加工过程中有明显的热效应存在,而且随着激光与材料作用时间的增加工件表面会产生微裂纹以及再铸层;脉冲宽度低于5 ps的皮秒激

收稿日期: 2016-08-10; **收到修改稿日期:** 2016-09-29; **网络出版日期:** 2016-12-26

基金项目: 国家863计划(2011AA12A103)

作者简介: 杨冬冬(1984—),男,硕士,工程师,主要从事皮秒激光技术以及微纳加工方面的研究。

E-mail: 13716988751@139.com

光与材料作用时会产生非线性效应,这对金属材料的加工非常不利。因此,适合微纳精密加工用的皮秒激光的脉冲宽度在 $5\sim 10$ ps之间。为了提高加工效率,重复频率一般设定在十万赫兹量级,而平均功率则根据所加工材料的烧蚀阈值而定。

本文介绍了研制适用于微纳加工皮秒激光器的技术路线,汇总了皮秒激光在精密微孔加工、精密切割、选择性去除方面的研究进展,分析了皮秒激光在加工过程中存在的问题及发展方向,为下一步利用飞秒激光实现精密微纳加工提供了参考。

2 研制适用于微纳加工的皮秒激光器的技术路线

皮秒激光精密微纳加工系统中,皮秒激光器是加工系统的核心,性能优异的皮秒激光器能实现优良的加工效果。研制适合微纳加工用的皮秒激光器的技术路线分为主振荡功率放大(MOPA)^[6-9]技术和腔倒空^[10-11]技术,两种技术的光路图分别如图1和图2所示。

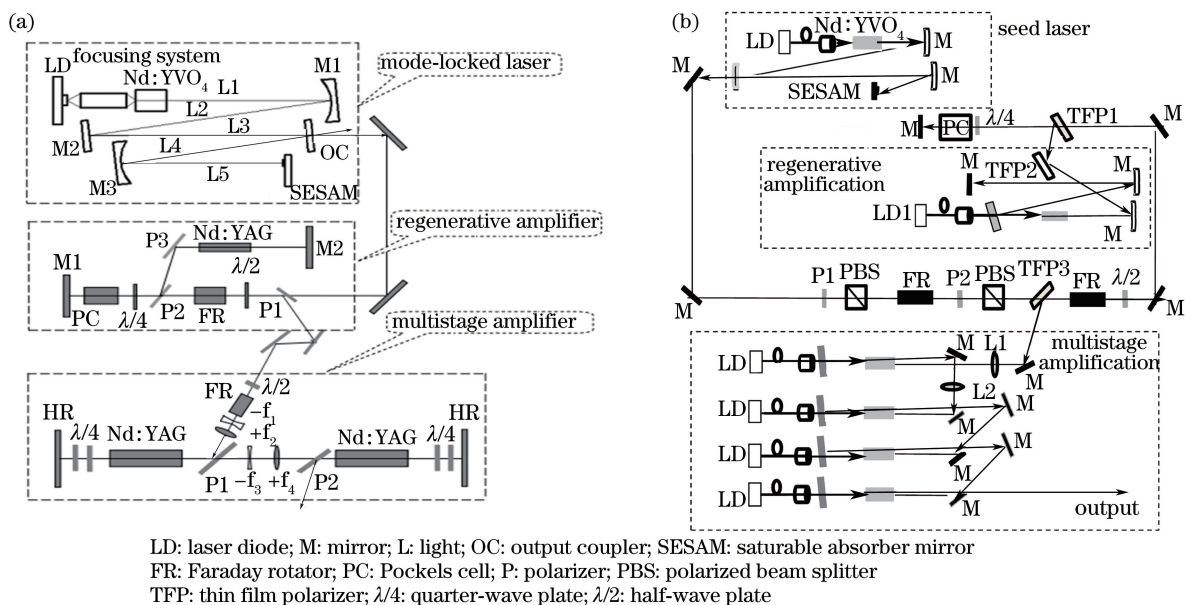


图1 (a) MOPA皮秒激光器光路图;(b)实验中微纳加工用皮秒激光器光路图

Fig. 1 (a) Beam path diagram of MOPA picosecond laser; (b) beam path diagram of picosecond laser for micro-nano fabrication in experiment

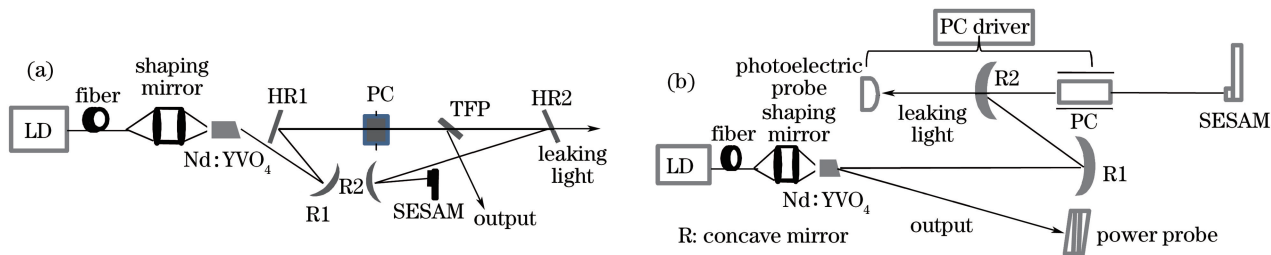


图2 (a) 10 kHz腔倒空皮秒激光器光路;(b) 500 kHz~1 MHz可调腔倒空皮秒激光器光路

Fig. 2 (a) Cavity dumping picosecond laser of 10 kHz; (b) cavity dumping adjustable picosecond laser for 500 kHz-1 MHz

3 皮秒激光微纳加工研究进展

3.1 皮秒激光精密微孔加工应用

作为一种激光精密加工技术,皮秒激光在对高硬度金属微孔加工方面的应用早在20世纪90年代初就有报道。1996年德国学者Chichkov等^[12]研究了纳秒、皮秒以及飞秒激光与材料的作用机理,并在真空靶室

中对厚度 $100\ \mu\text{m}$ 的不锈钢进行了打孔实验,首次建立了激光微纳加工的理论模型,为后续的激光微纳加工实验研究奠定了坚实的理论基础。1998年 Jandeleit 等^[13]对厚度为 $250\ \text{nm}$ 的铜膜进行了精密制孔实验,实验结果如图 3 所示,实验指出使用同一脉宽的皮秒激光器对厚度较薄的金属材料制孔时,采用高峰值功率更有可能获得优秀的制孔效果。

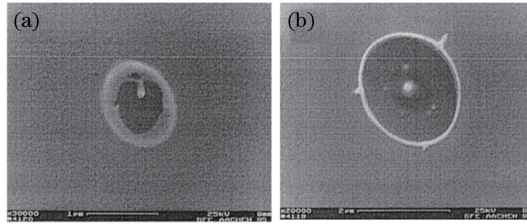


图 3 不同峰值功率密度激光对铜膜(厚度 $d=250\ \text{nm}$)的精密打孔。(a) $4.8 \times 10^9\ \text{W}/\text{cm}^2$; (b) $7.9 \times 10^9\ \text{W}/\text{cm}^2$

Fig. 3 Drilling on copper film under different laser peak power densities ($d=250\ \text{nm}$). (a) $4.8 \times 10^9\ \text{W}/\text{cm}^2$; (b) $7.9 \times 10^9\ \text{W}/\text{cm}^2$

然而,优异的加工效果不仅仅取决于脉冲宽度以及峰值功率,制孔方式也是一个至关重要的因素,针对这一问题,Fohl 等^[14]采用纳秒激光与飞秒激光对制孔方式进行了深入研究。图 4 为纳秒激光与飞秒激光对 $1\ \text{mm}$ 不锈钢的加工效果,图中 τ 为脉冲宽度。实验结果显示纳秒激光采用螺旋制孔方式所加工的微孔整洁干净,而飞秒激光采用一般的冲击制孔方式所加工的微孔边缘有明显的再铸层。

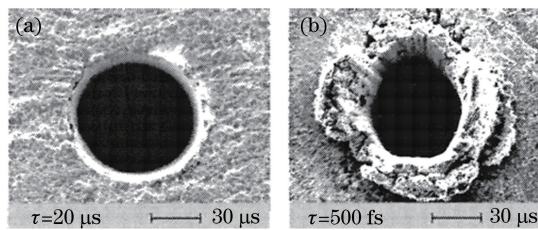


图 4 不锈钢的加工效果。(a) 纳秒激光; (b) 飞秒激光

Fig. 4 Fabrication results of stainless steel. (a) Using nanosecond laser; (b) using femtosecond laser

2012年北京工业大学 Duan 等^[15]使用课题组自行研制的皮秒激光器对金属钼、钛和不锈钢进行了精密制孔研究,并利用旋切制孔方式对厚度为 $0.3\ \text{mm}$ 的金属钼实现了孔径 ϕ 小于 $200\ \mu\text{m}$ 的微孔加工,利用螺旋制孔方式在厚度为 $1\ \text{mm}$ 不锈钢上实现了孔径为 $200\ \mu\text{m}$ 的制孔效果,实验结果如图 5 所示。实验指出大口径微孔加工应采用旋切制孔方式,而加工较小口径时则更宜选用螺旋制孔方式。

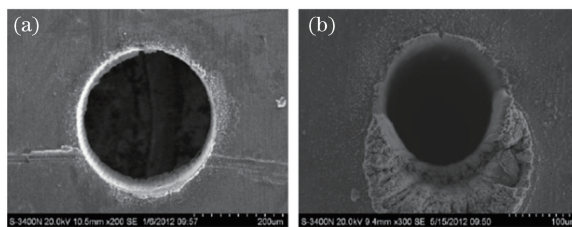


图 5 (a) $0.3\ \text{mm}$ 钼上制孔($\phi < 200\ \mu\text{m}$); (b) $1\ \text{mm}$ 不锈钢制孔($\phi = 200\ \mu\text{m}$)

Fig. 5 (a) Drilling on molybdenum ($d=0.3\ \text{mm}$, $\phi < 200\ \mu\text{m}$); (b) drilling on stainless steel ($d=1\ \text{mm}$, $\phi = 200\ \mu\text{m}$)

皮秒激光精密微孔加工过程中,对于厚度较小的材料($d < 1\ \mu\text{m}$),由于激光与材料作用的时间较短,以采用高峰值功率、窄脉宽的激光为宜,而对于厚度在百微米甚至超过 $1\ \text{mm}$ 的金属材料的微孔加工,除了要考虑激光峰值功率以及脉冲宽度外,选择合适的制孔方式是必要的。此外,根据材料结构的不同还应该选择是否采用偏振输出等因素。

随着我国航天技术的不断进步,对核心器件的加工越来越趋于自主化。其中利用皮秒激光对航空发动机核心部件(涡轮叶片、导向叶片、燃烧室)的气膜孔进行加工是近几年的一种新兴技术,而这些核心部件的

材料一般是高温镍基合金或者是高温钛合金等硬度较大的金属,其硬度已经远远超过了加工刀具的硬度。而以电火花^[16-17]、电液束^[18]以及纳秒激光^[19]等为主的传统加工方式受限于加工精度、表面微裂纹、再铸层以及孔的圆度、倾角等诸多因素而不能满足要求。Knappe等^[20]利用皮秒激光对1 mm厚的镍基材料进行了直径为400 μm 、倾角为60°的冷却孔加工实验,实验结果如图6所示。实验表明皮秒激光在航空发动机气膜孔加工方面确有其独到之处,特别是在异型及深微孔加工方面更有其明显优势。因此,皮秒激光技术发展起来后在这一领域得到了广泛应用。

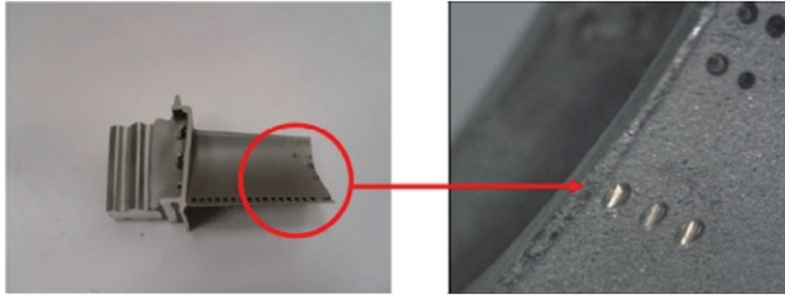


图6 皮秒激光对1 mm厚镍基合金的冷却孔加工

Fig. 6 Cooling hole drilling on nickel based alloy ($d=1$ mm) by picosecond laser

3.2 皮秒激光精密切割应用

2004年德国著名的Lumera激光公司首次通过实验对比了纳秒激光、皮秒激光以及飞秒激光对50 μm 厚硅片的切割效果,结果如图7所示^[21]。对比实验表明,在对硅片进行精密切割时皮秒激光的切割效果远远优于纳秒激光,可与飞秒激光相比拟,但是切割效率远高于飞秒激光。

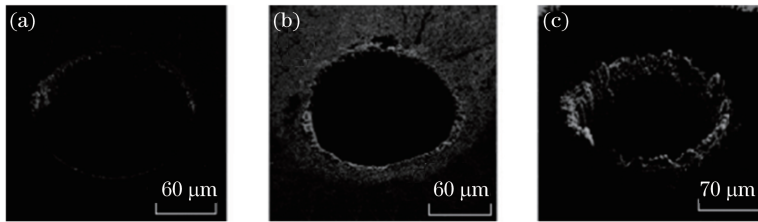


图7 50 μm 厚硅片激光切割效果对比。(a) 飞秒; (b) 皮秒; (c) 纳秒

Fig. 7 Comparison of 50 μm silicon cutting results by different lasers. (a) Femtosecond; (b) picosecond; (c) nanosecond

2005年Klimt等^[22]利用平均功率为5 W的皮秒激光器在厚度分别为80 μm 的硅基和300 μm 的硅晶圆上进行了划线与切割的实验研究,如图8所示。切割效率和切割质量都非常优异,且用很短的时间就完成了边缘整齐光滑、无挂渣的晶圆切割。

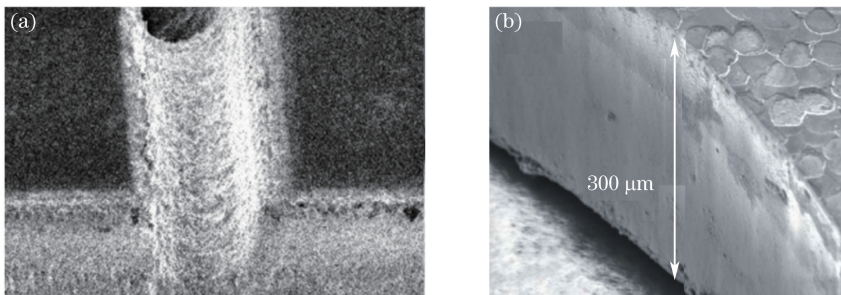


图8 (a) 皮秒激光对80 μm 厚硅基划线; (b) 皮秒激光对300 μm 厚硅晶圆切割

Fig. 8 (a) Lination on silicon substrate ($d=80$ μm) by using picosecond laser; (b) cutting silicon wafer ($d=300$ μm) by using picosecond laser

2006年Karnakis等^[23]分别采用1064 nm和355 nm两个波长的皮秒激光对熔融石英进行盲槽加工,加工效果如图9所示。从整体加工效果来看,盲槽边缘整齐,无裂纹产生,无热影响。从平均表面粗糙度 R_a 。

来看,1064 nm 皮秒激光的加工效果稍逊于 355 nm, R_a 由 0.99(1064 nm) 下降到 0.434(355 nm), 切割效果有很大改善。因此,对于较高透过率材料的精密加工,选用波长较短的皮秒激光增加材料的吸收率能得到理想的加工效果。

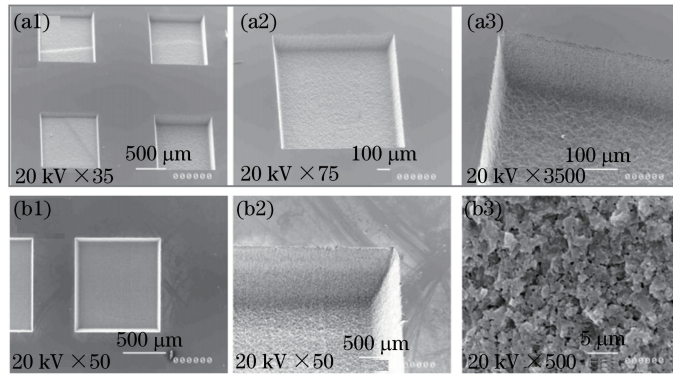


图 9 不同波长皮秒激光对熔融石英表面盲槽加工的扫描电镜图。(a1)~(a3) 1064 nm; (b1)~(b3) 355 nm

Fig. 9 Scanning electron microscope results of fused silica fabricated by picosecond laser with different wavelengths.

(a1)-(a3) 1064 nm; (b1)-(b3) 355 nm

2015 年李勇等^[24]首次在国内报道了使用 1064 nm 皮秒激光器对厚度为 0.3 mm 的石英玻璃片进行激光划线切割的实验。在激光功率为 20 W, 占空比为 60%, 频率为 100 kHz, 加工速度为 700 mm/s 时, 获得样品正面崩边为 11.08 μm , 背面崩边为 7.610 μm , 侧面粗糙度为 4 μm 的加工效果, 结果如图 10 所示, 这一系列的实验研究填补了我国利用皮秒激光进行玻璃材料切割的空白。

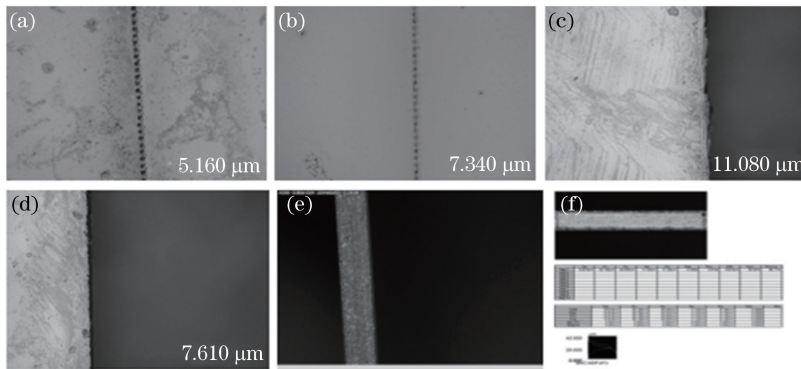


图 10 皮秒激光石英玻璃划线切割实验结果。(a) 小孔间距; (b) 小孔直径; (c) 正面崩边; (d) 背面崩边; (e) 断面照片; (f) 粗糙度检测报告

Fig. 10 Experiment results of line cutting on silica glass by picosecond laser. (a) Hole spacing; (b) hole diameter; (c) positive side damage; (d) reverse side damage; (e) photo of cross section; (f) test report of roughness

2016 年边晓微等^[25]实验对比了 355 nm 纳秒激光与 1064 nm 皮秒激光对蓝宝石的加工效果, 实验结果如图 11 所示。结果显示纳秒激光由于峰值功率低达不到“切透”基片的目的, 加工过程中存在很大的热效应且刻蚀效率较低, 而皮秒激光以高的峰值功率以及独特的冷烧蚀特点可实现很好的切割效果。

硅是半导体行业的重要基石, 石英材料是良好的光学元器件材料, 而蓝宝石在显示行业具有举足轻重的地位。皮秒激光对硅晶圆、石英以及蓝宝石基片等硬脆性材料的良好切割效果必将引起科研人员的广泛研究, 从而带动这个产业不断发展。随着集成电路、电子消费品市场以及显示行业的快速发展, 以硅晶圆、石英、钢化玻璃以及蓝宝石为代表的材料逐渐被广泛应用, 而这些材料会越来越薄, 合成材料的硬度将越来越大, 这就更加体现出皮秒激光精细加工的重要性, 同时也对皮秒激光提出了更为严峻的考验。

此外, 对金属以及柔性材料而言, 皮秒激光也能实现很好的切割效果。利用自行研制的皮秒激光器 (1064 nm, 10 ps, 25 W@100 kHz), 本课题组已经成功实现了铝箔、紫铜等多种金属的精密加工。图 12 为铝箔热管的切口效果, 可以看到加工后切口边缘整齐, 光滑无挂渣。皮秒激光切割效果比传统的机械切割效果

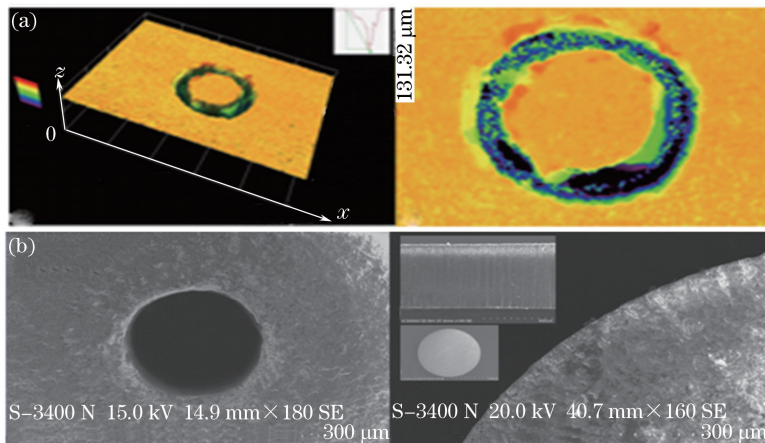


图 11 蓝宝石切割效果。(a) 使用 355 nm 纳秒激光;(b) 使用 1064 nm 皮秒激光

Fig. 11 Results of cutting sapphire. (a) Using 355 nm nanosecond laser; (b) using 1064 nm picosecond laser

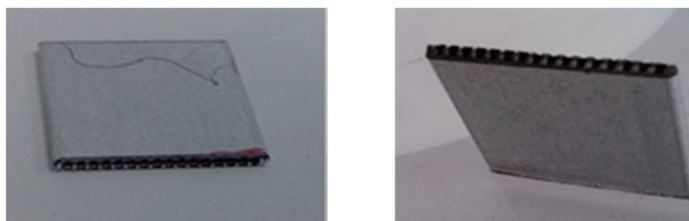


图 12 皮秒激光铝箔切割效果

Fig. 12 Results of cutting aluminum foil by picosecond laser

好这一事实也已在实际使用中得到了验证。出于保密的需求,其他金属的切割效果图不在此一一列举。

3.3 皮秒激光选择性去除应用

皮秒激光凭借其独特的“冷烧蚀”效应,也被应用于激光选择性去除,最具代表性的是柔性基底薄膜太阳能电池电极加工。薄膜太阳能电池属于叠层器件,其结构如图 13(a)所示。相对于传统电子器件,叠层器件具有功耗低、体积小、易集成、携带方便等突出优点,被广泛用于电子行业及显示行业。然而,其电极的制备工艺较为复杂,若使用传统的纳秒激光制备,其加工过程中存在两方面的不足:1)熔融物和挂渣不易去除;2)在对上层材料的去除过程中对下层材料有热损伤。这两点都是由于纳秒激光不具备“冷烧蚀”的特性所造成的,而利用皮秒激光则能完成全部的加工工序,具体的加工工序如图 13(b)所示。结构中需要选择去除的部分包括 P1 区(1 μm)的 Mo 层、P2 区(厚 1~3 μm,宽 50~70 μm)的铜钢硒(CIGS)吸收层和 P3 区(厚

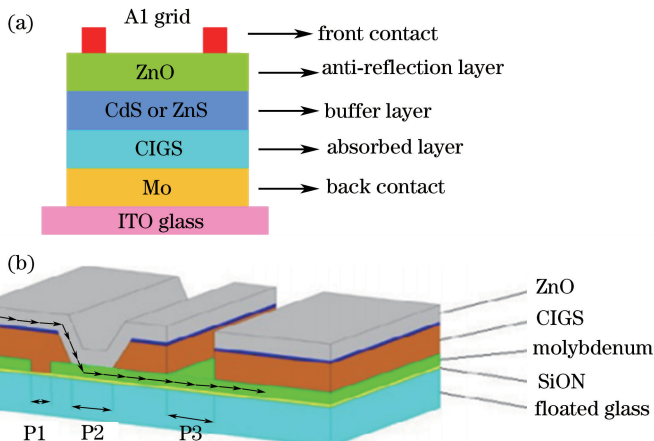


图 13 (a) 薄膜太阳能电池叠层结构;(b) 皮秒激光加工工序图

Fig. 13 (a) Structure of thin-film solar cell; (b) machining process by picosecond laser

1~2 μm ,宽 50~70 μm)的 ZnO 极层。2010 年 Gečys 等^[26]利用三波长(1064/532/355 nm)输出的皮秒激光器,通过控制加工频率以及单脉冲能量对薄膜太阳能电池 ITO/CIGS/Mo/PI 构型进行 P1 工序加工,实验结果如图 14 所示。实验结果表明,在 P1 工序加工中适当地降低脉冲能量、提高频率可得到较好的结果。在选择性去除铜锡氧化物(ITO)和铜锡硫化物(CIGS)时,利用 355 nm 波长皮秒激光加工后没有明显的损伤迹象,而且 355 nm 波段还可进行 P3 工序加工。相比之下,使用 1064/532 nm 波段去除 CIGS 层时会产生明显的融化迹象。

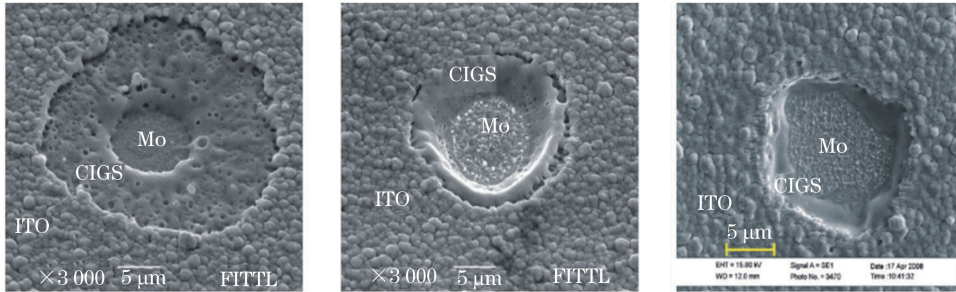


图 14 三波长皮秒激光对 ITO/CIGS/Mo/PI 构型薄膜太阳能电池的 P1 工序加工 (355/532/1064 nm)

Fig. 14 P1 process of ITO/CIGS/Mo/PI structure by picosecond laser (355/532/1064 nm)

德国慕尼黑的 Heise 等^[27]于 2012 年报道了使用 High-Q 公司生产的皮秒激光器对 300 mm×300 mm 大面积的太阳能薄膜电池依次进行 P1,P2,P3 三道工序的加工。在 P1 工序中,受扫描头速度的限制,去除速率只能达到 15 m/s。在 P2 工序中,采用过高频率多脉冲的方式保证 ZnO 和 Mo 层具有良好的导电接触。在 P3 工序中,透明层通过间接诱导烧蚀可以实现 15 m/s 的去除速度。最终制得的电池效率达到 14.7%,将皮秒激光对三道工序的加工效果与纳秒激光加工效果进行比较,结果如图 15 所示。

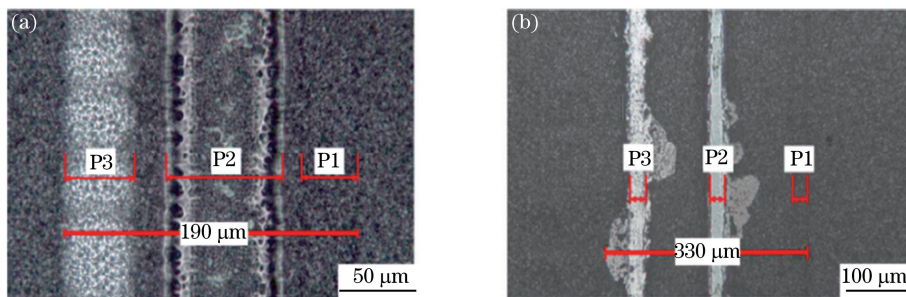


图 15 P1,P2,P3 工序的加工效果。(a) 皮秒激光;(b) 纳秒激光

Fig. 15 Processing effect of P1, P2, P3. (a) Using picosecond laser; (b) using nanosecond laser

薄膜太阳能电池是我国光伏行业极具竞争力的新型产业,属于国家支持的先进高新技术企业,皮秒激光对其良好的选择性去除作用可以确保薄膜电池器件具有高效、高功能性,同时还有助于实现大面积薄膜器件的微加工,从而极大程度地推动了我国光伏行业不断发展。

4 存在的问题及发展方向

4.1 存在的问题

尽管皮秒激光所能加工的材料范围很广而且精度很高,但是在实际的应用中还存在以下几个方面的问题:

- 1) 理论上,激光与材料作用的机理尚不清楚,而激光与材料的作用机理对激光参数的选择以及实现优质的加工效果起决定性的作用。
- 2) 激光器功率不高。受限于激光器本身的输出功率,只能对厚度较小的材料实现精密加工。
- 3) 与之配套的加工设施还不完善。国内还没有企业能实现对一些精密设施的批量生产,如钻孔(旋切)光学模组,多光束并行加工模组以及加工过程中所需要的动态聚焦监控等。

整套皮秒激光微纳加工系统是光、机、电、气高度配合的自动化装置,从传输光路设计到软件控制以及最

后的硬件设备的相互协调是一项巨大的工程。

4.2 发展方向展望

根据目前皮秒激光微纳加工的研究现状和发展趋势,皮秒激光微纳加工的发展方向有以下几个方面:

1) 深入研究皮秒激光与材料的作用机理,完善皮秒激光微纳加工的理论,为实验做好前期准备。

2) 研发高功率高重复频率的皮秒激光器,拓宽加工材料厚度的同时提高加工效率。目前,国内商用的十万赫兹皮秒激光器功率最高为 50 W,国外功率虽超百瓦,但是使用成本及其昂贵,而且还存在禁运问题。因此,研发具有自主知识产权的百瓦级高重复频率皮秒激光器就显得尤为重要。

3) 研发多功能皮秒激光微纳加工自动化设备,完全解放双手,与国际接轨。国外在这一方面起步早而且投入比重也很大,很多著名的公司(COHERENT, IPG, EKSPLA, TruMPF 等)能够批量生产整套的自动化设备,其技术先进,设备性能稳定,但售价高昂,这也是促使国内各大激光技术公司致力于研发皮秒激光器的主要原因。国内仅仅苏州德龙激光技术股份有限公司、武汉华工激光工程有限责任公司等为数不多的几个公司能够研发整机自动化设备,已经实现了对蓝宝石、K9 玻璃以及不锈钢、陶瓷等材料的批量加工。图 16 为德龙激光技术股份有限公司所研发的皮秒激光自动化设备,可用于蓝宝石、硅晶圆、LED 条、钢化玻璃的精密切割,加工幅面为 730 mm×920 mm,加工速度为 1000 mm/s。2016 年 3 月 15 日上海慕尼黑光博会期间,此公司展出最新研发的紫外皮秒五轴切割设备,虽然功率只有 3 W,但是从技术角度以及实用化角度,此设备所使用的技术以及实现的功能都在国内处于领先水平。



图 16 德龙激光技术股份有限公司皮秒激光自动化设备

Fig. 16 Picosecond laser automation equipment of DeLong company

5 结 论

介于纳秒与飞秒之间的皮秒激光以其独特的“冷烧蚀”效应在工业上被广泛的应用,随着皮秒激光各参数(功率、重复频率、单脉冲能量及光束质量)性能的不不断提升,可使用皮秒激光进行微纳加工的材料种类会越来越多,加工精度会越来越高。尽管皮秒激光与材料作用的机理以及与之配套的加工设施还不完善,但其独特的去除机制,几乎无热作用的加工效果,稳定的输出控制,以及低廉的使用成本,必将在精密仪器、集成电路、生物工程、激光 3D 领域等新型领域获得用武之地。此外,飞秒激光作为工业微纳加工的另一把利器也在不断进步,但是飞秒激光存在系统复杂、成本昂贵、稳定性不高等问题,并且仅国外少数几家公司能够提供整机产品。而国内关于飞秒激光的输出与控制还处于实验研究阶段,目前还没有能力生产适合微纳加工用的飞秒激光器,因此利用飞秒激光实现精密微纳加工还有很大的研究空间。

参 考 文 献

- [1] Zhou Hui, Yang Haifeng, Research status and prospect of the lithography and micro-nano manufacturing technology [J]. Micronanoelectronic Technology, 2012, 49(9): 616-618.
周 辉, 杨海峰. 光刻与微纳制造技术的研究现状及展望[J]. 微纳电子技术, 2012, 49(9): 616-618.
- [2] Zhang Bi, Luo Hongping, Zhou Zhixiong, *et al.* Recent advances in electrochemical micromachining [J]. China Mechanical Engineering, 2007, 18(12): 1505-1511.
张 璧, 罗红平, 周志雄, 等. 电化学微加工技术的新进展及关键技术[J]. 中国机械工程, 2007, 18(12): 1505-1511.
- [3] Zhang Xiang, Zhang Shixun, Li Qian, *et al.* Recent advances in micro injection molding [J]. Polymer Materials Science

- & Engineering, 2012, 28(5): 148-152.
- 张响, 张世勋, 李倩, 等. 微注射成型研究进展[J]. 高分子材料科学与工程, 2012, 28(5): 148-152.
- [4] Peng Jing, Xu Zhimou, Wu Xiaofeng, *et al.* A study of LED with surface photonic crystal structure fabricated by the nanoimprint lithography[J]. Acta Physica Sinica, 2013, 62(3): 036104.
- 彭静, 徐智谋, 吴小峰, 等. 纳米压印技术制备表面光子晶体 LED 的研究[J]. 物理学报, 2013, 62(3): 036104.
- [5] Dausinger F, Hugel H, Konov V I. Micromachining with ultrashort laser pulses: from basic understanding to technical applications[C]. SPIE, 2003, 5147: 106-115.
- [6] Li Gang, Chang Liang, Zhang Bingyuan, *et al.* ps laser pulse regenerative amplifier pumped by LD[J]. Infrared and Laser Engineering, 2007, 36(s1): 122-124.
- 李港, 常亮, 张丙元, 等. LD 泵浦皮秒激光脉冲再生放大器[J]. 红外与激光工程, 2007, 36(s1): 122-124.
- [7] Ma Yunfeng, Yu Jin, Niu Gang, *et al.* 25 W high repetition rate picosecond green laser[J]. Chinese J Lasers, 2011, 38(12): 1202010.
- 麻云凤, 余锦, 牛岗, 等. 高重复频率 25W 皮秒绿光激光器[J]. 中国激光, 2011, 38(12): 1202010.
- [8] Huang Yutao, Fan Zhongwei, Niu Gang, *et al.* 100 kHz repetition rate picosecond regenerative amplifier with high pulse stability[J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(5): 0502009.
- 黄玉涛, 樊仲维, 牛岗, 等. 高脉冲稳定性的 100 kHz 皮秒再生放大器[J]. 中国激光, 2012, 39(5): 0502009.
- [9] Yan Ying, Niu Gang, Fan Zhongwei, *et al.* Laser diode end-pumped kilohertz Nd:YVO₄ picosecond regenerative amplifier[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2012, 49(2): 021402.
- 闫莹, 牛岗, 樊仲维, 等. 激光二极管千赫兹级 Nd:YVO₄ 皮秒脉冲激光再生放大器[J]. 激光与光电子学进展, 2012, 49(2): 021402.
- [10] Fu Jie, Pang Qingsheng, Chang Liang, *et al.* Research on cavity-dumping mode-locked laser of picosecond at 10 kHz[J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(3): 0314002.
- 付洁, 庞庆生, 常亮, 等. 10 kHz 腔倒空锁模皮秒激光器研究[J]. 光学学报, 2011, 31(3): 0314002.
- [11] Yang Chao, Chen Meng, Bai Zhenxu, *et al.* Research on industrial processing used high repetition rate cavity-dumping mode-locked picosecond laser[J]. Applied Laser, 2013, 33(2): 204-207.
- 杨超, 陈蒙, 白振旭, 等. 工业加工用高重复腔倒空锁模皮秒激光器研究[J]. 应用激光, 2013, 33(2): 204-207.
- [12] Chichkov B N, Momma C, Nolte S, *et al.* Femtosecond, picosecond and nanosecond laser ablation of solids[J]. Applied Physics A, 1996, 63(2): 109-115.
- [13] Jandeleit J, Horn A, Weichenhain R, *et al.* Fundamental investigations of micromachining by nano- and picosecond laser radiation[J]. Applied Surface Science, 1998, 127: 885-891.
- [14] Foehl C, Breitling D, Jasper K, *et al.* Precision drilling of metals and ceramics with short- and ultrashort-pulsed solid state lasers[C]. SPIE, 2002, 4426: 104-107.
- [15] Duan J P, Chen M, Bai Z X, *et al.* Research on the metal ablation thresholds of picosecond laser[J]. Applied Mechanics and Materials, 2012, 190-191: 547-550.
- [16] Peng Guoping, Peng Xiuyun. Processing technology of film cooling holes on engine turbine guide vanes[J]. Aerospace Manufacturing Technology, 2008(6): 26-29.
- 彭国平, 彭秀云. 发动机涡轮导向叶片气膜孔加工工艺[J]. 航天制造技术, 2008(6): 26-29.
- [17] Yin Dapeng. Maching technology of cooling air film holes on turbine blades of aero plane engines[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2013: 10-30.
- 尹大鹏. 航空发动机涡轮叶片冷却气膜孔加工技术[D]. 大连: 大连理工大学, 2013: 10-30.
- [18] Zhang Hua, Xu Jiawen, Wang Jiming. Experimental study of hybrid processing of jet electrochemical machining and laser beam machining on nickel-based superalloy[J]. Materials Engineering, 2009(4): 75-80.
- 张华, 徐家文, 王吉明. 镍基高温合金喷射液电电解-激光复合加工试验研究[J]. 材料工程, 2009(4): 75-80.
- [19] Zhang Xiaobing, Sun Ruifeng. Sequential laser drilling technology[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2014, 35(3): 894-901.
- 张晓兵, 孙瑞峰. 二次法激光加工小孔技术[J]. 航空学报, 2014, 35(3): 894-901.
- [20] Knappe R, Haloui H, Seifert A, *et al.* Scaling ablation rates for picosecond lasers using burst micromachining[C]. SPIE, 2010, 7585: 75850H.

- [21] Herrmann T, Klimt B, Siegel F. Micromachining with picosecond laser pulses[EB/OL]. (2014-10-01)[2015-08-20]. <http://www.industrial-lasers.com/articles/2004/10/micromachining-with-picosecond-laser-pulses.html>.
- [22] Klimt B H, Herrmann T. Very high repetition rate ps-laser for cost effective micro-machining [C]. Photonic Applications Systems Technologies Conference, 2005, PThB: PThB2.
- [23] Karnakis D, Rutterford G, Knowles M, *et al.* High quality laser milling of ceramics, dielectrics and metals using nanosecond and picosecond lasers[C]. SPIE, 2006, 6106: 610604.
- [24] Li Yong, Zhu Yun. Research of quartz glass precise scribing by 1064 nm picosecond laser[J]. Laser Journal, 2015, 36(1): 132-134.
李 勇, 朱 芸. 利用 1064 nm 皮秒激光加工石英玻璃精密划线工艺研究[J]. 激光杂志, 2015, 36(1): 132-134.
- [25] Bian Xiaowei, Chen Meng, Li Gang. Study on machining of sapphire by 355 nm nanosecond and 1064 nm picosecond laser[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2016, 53(5): 051404.
边晓微, 陈 蒙, 李 港. 355 nm 纳秒和 1064 nm 皮秒激光加工蓝宝石研究[J]. 激光与光电子学进展, 2016, 53(5): 051404.
- [26] Gečys P, Račiukaitis G, Ehrhardt M, *et al.* ps-laser scribing of CIGS films at different wavelengths[J]. Applied Physics A, 2010, 101(2): 373-378.
- [27] Heise G, Heiss A, Vogt H, *et al.* Ultrafast lasers improve the efficiency of CIS thin film solar cells[J]. Physics Procedia, 2012, 39: 702-708.